

УДК 539.17.02

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Буртебаев Н., Мадигалин Г.А., Еденбаев А.Н., Кенжебеков А.С.

*Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

В данной работе приводится описание экспериментальных данных упругого рассеяния системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  с двумя способами: по оптической модели с  $l$ -зависимым кором и комбинированным способом. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами на основе предложенных методов. Из анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию в широком интервале энергий найдены глобальные параметры оптического потенциала взаимодействия.

Целью работы является более точное описание экспериментальных данных по упругому рассеянию систем  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  при энергиях  $E_{lab}=15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$  МэВ. Исследуется роль обменного взаимодействия в области задних углов. Получены коэффициенты сжимаемости ядерной материи, которые согласуются с величиной, полученной из данных по гигантскому монополюму резонансу. Для воспроизведения сечения в задней полусфере учитывалась передача  $\alpha$ -кластера.

**ВВЕДЕНИЕ**

Конечная стадия эволюции массивных звезд завершается циклом горения ядер углерода, кислорода и др. более тяжелых альфа-кластерных ядер. Правильная оценка энергетического баланса процесса взрыва сверхновой связана с точными расчетами по нуклеосинтезу с участием легких ядер. Для проведения таких расчетов необходимо иметь достоверные параметры ядерно-ядерного взаимодействия для легких ядерных систем и информацию об их структуре.

В настоящей работе описание экспериментальных данных упругого рассеяния системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  проводилось двумя способами: по оптической модели с  $l$ -зависимым кором и комбинированным способом. Последний заключается в описании данных с помощью оптической модели (ОМ) и метода искаженных волн (МИВ), который учитывал обменный процесс. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами на основе предложенных методов. Экспериментальные данные для системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  были взяты из работ [1-3].

Одним из методов получения информации о взаимодействии ядер является феноменологический анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию в рамках оптической модели. Результат феноменологического анализа в большей степени предопределен выбором радиальной зависимости потенциала [4].

Интерес к изучению упругого рассеяния тяжелых ионов связан с тем, что для них характерно отклонение от модели сильного поглощения, что позволяет изучать взаимодействие на малых расстояниях и свойства ядерной материи. Также для таких ионов во многих реакциях наблюдается подъем дифференциального сечения на большие углы, в широком интервале энергий. Этот эффект находит объяснение в модели слабого поглощения, в которой появляется возможность орбитирования, что означает вращение сталкивающихся ядер друг относительно

друга при сохранении индивидуальности. Для описания этих состояний становится целесообразным введение в оптический потенциал отталкивающего кора. Помимо отталкивающего кора рост сечения рассеяния на больших углах для ядер сравнимой массы может быть следствием передачи кластера. Это может быть инструментом для изучения кластерных эффектов в основных состояниях ядер. С этой целью выполнен теоретический анализ угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в широком интервале энергий.

**РАСЧЕТЫ****Теоретическое описание упругого рассеяния  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  в рамках оптической модели**

В данной работе для расчетов угловых распределений упругого рассеяния тяжелых ионов в рамках оптической модели был использован следующий вид феноменологического ядро-ядерного потенциала:

$$U(r) = V_{coul}(r) - Vf_V(r) - iWf_W(r) + 4ia_{W_d} W_d \frac{df_{W_d}(r)}{dr} + V_{core}(r), \quad (1)$$

где  $V_{coul}$  – кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы,  $V$ ,  $W$ ,  $W_d$  – параметры, определяющие глубины вещественного потенциала и потенциалов объемного и поверхностного поглощения. Кулоновская компонента потенциала взаимодействия точечного заряда  $Z_a e$  с однородно заряженной сферой, имеющей заряд  $Z_A e$  и радиус  $R$ . Следующие два слагаемых в выражении (1) являются ядерным оптическим потенциалом типа Вудса–Саксона с объемным поглощением. Радиальная зависимость потенциалов выбиралась в форме Вудса–Саксона:

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - R_x}{a_x}\right)}, \quad (2)$$

где  $R_x = r_x (A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$ ,  $x = V, W, W_d$ . Для более корректного описания упругого рассеяния в задней полусфере вводится отталкивающий кор с  $l$ -зависимостью в параболической форме:

$$V_c(r) = \begin{cases} V_k(r), & r \leq R_c \\ 0, & r > R_c \end{cases}$$

$$V_k(r) = C \left( 1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right) \quad (3)$$

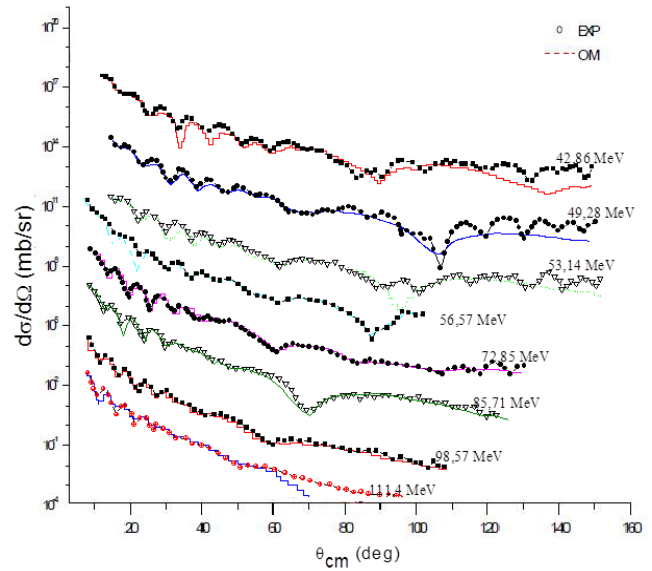
$$R_c = r_k + \frac{\Delta r (1 - (-1)^l)}{2},$$

где  $C, r_k, \Delta r$  – свободные параметры. Для радиуса кора должно примерно выполняться соотношение  $r_k \approx R_t + R_p$ .  $l$ -зависимость потенциала кора вводится для описания расщепления полос положительной и отрицательной четности [2].

Оптимальные параметры оптических потенциалов для системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями. Теоретические расчеты выполнялись по программе SPI-GENOA, реализованной на персональном компьютере. Автоматический поиск оптимальных параметров ОП производился путем минимизации величины  $\chi^2 / N$ . Итоговые значения параметров потенциалов, полученных в результате описании экспериментальных угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в рамках ОМ (см. рис.1) в интервале энергии 15-111 МэВ представлены в таблице.

Как видно из рисунка 1, расчеты по оптической модели с  $l$ -зависимым потенциалом позволяют достаточно корректно описать экспериментальные данные по упругому рассеянию в интервале энергии 42

– 111 МэВ, за исключением угловых распределений в предельно больших углах при низких энергиях. Найденные при этом значения коэффициента сжимаемости ядерной матери согласуются с величиной, полученной из анализа данных по гигантскому монополюному резонансу ( $\approx 250$  МэВ) [5].



сплошные кривые – расчеты по оптической модели, точки – эксперимент  
Рисунок 1. Угловая зависимость дифференциальных сечений  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  при различных энергиях

Расхождение расчетных величин от экспериментальных сечений при низких энергиях в области обратных углов, скорее всего, связано с вкладом механизма упругой передачи кластера в процесс рассеяния, которого стандартная оптическая модель не может учесть.

Таблица. Параметры оптических потенциалов для системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$

E	V <sub>0</sub>	W <sub>0</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>w</sub>	r <sub>v</sub>	r <sub>w</sub>	J <sub>v</sub>	J <sub>w</sub>	R <sub>c</sub>
15	107.06	39.0	0.439	0.155	1.18	1.25	452.06	186.2	1.25
18	92.9	16.87	0.453	0.2945	1.18	1.25	394.16	85.6	1.25
21	98.28	11.94	0.4579	0.378	1.18	1.25	417.97	58.75	1.25
42.86	321.35	12.88	0.621	0.534	0.76	1.261	439.75	67.46	0.95
49.28	296.31	13.77	0.722	0.4026	0.76	1.261	438.28	69.9	0.95
53.14	293.97	14.39	0.731	0.623	0.76	1.261	436.89	77.31	0.95
56.57	291.91	15.38	0.598	0.627	0.76	1.261	393.13	82.73	0.95
72.85	280.69	16.408	0.698	0.556	0.76	1.261	406.71	86.46	0.95
85.71	213.218	17.138	0.857	0.554	0.76	1.261	350.62	90.01	0.95
98.57	195.6	19.15	0.767	0.459	0.76	1.261	289.55	98.45	0.95
111.4	168.29	24.863	0.801	0.4542	0.76	1.261	264.37	127.68	0.95

**Результаты расчета по методу искаженных волн**

В теории рассеяния учет тождественности частиц приводит к процессам обмена. Описание обменной передачи является нетривиальной задачей. В связи с этим большое развитие получили приближенные методы вычислений. Одним из таких методов является МИВ, в котором, как известно, предполагается, что основной вклад в прямой процесс дает упругое рассеяние, а процессы, отличные от основного, рассматриваются как малое возмущение.

Для реакции  $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C})^{16}\text{O}$ , существенным процессом, влияющим на сечение упругого рассеяния на большие углы, является механизм передачи альфа-кластера налетающему ядру  $^{12}\text{C}$  от ядра-мишени  $^{16}\text{O}$ , с образованием ядра в основном состоянии. Такой процесс может быть описан в методе искаженных волн. Тогда полное сечение упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода с учетом механизма упругой передачи кластера  $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})^{12}\text{C}$  можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = |f_{el}(\theta) + e^{i\alpha} S f_{DWBA}(\pi - \theta)|^2, \quad (4)$$

где  $f_{el}(\theta)$  – амплитуда упругого рассеяния,  $f_{DWBA}(\pi - \theta)$  – амплитуда рассчитанная в методе искаженных волн, при расчетах МИВ проводилась замена на  $\pi - \theta$ , где замена  $\theta \rightarrow \pi - \theta$  связана с тем, что обмениваются одинаковые частицы,  $S$  – свободный параметр [6].

Расчет передачи альфа-кластера в рамках МИВ был выполнен с использованием стандартной программы DWUCK5. Для расчета были использованы параметры оптических потенциалов из таблицы, которые хорошо описывали экспериментальные данные в области передних углов. В качестве потенциала связанного состояния кластера с остовом использован потенциал Вудса–Саксона с параметрами радиуса  $R_0 = 1.25(A_c + A_\alpha)^{1/3}$  и диффузности  $a=0.065$ .

Квантовые числа состояния кластера определялись из соотношения Тальми-Мошинского

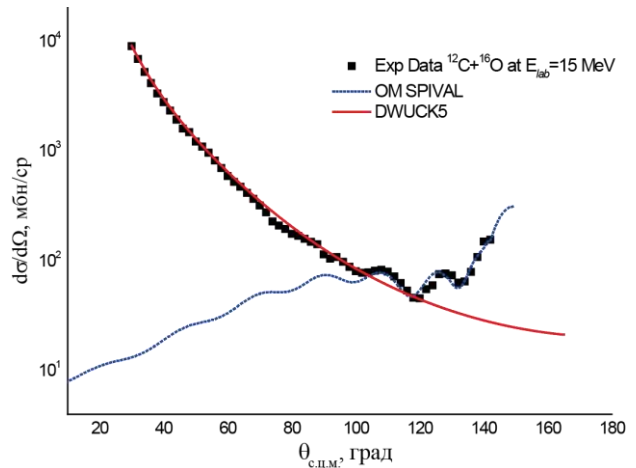
$$2(N-1) + L = \sum_{i=1}^4 2(n_i - 1) + l_i, \quad \text{где } n_i, l_i - \text{квантовые}$$

числа составляющих кластер нуклонов в модели гармонического осциллятора,  $N, L$  – квантовые числа кластера. В случае альфа-кластера в  $^{12}\text{C}$  получаем значение  $2N+L=6$ .

В итоге по формуле (4) были рассчитаны полное сечение упругого рассеяния для системы  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  при энергиях 15; 18 и 21 МэВ [3]. На рис. 2 показано в качестве примера результаты описания экспериментальных данных по рассеянию при энергии 15 МэВ. Как видно из рисунка, теоретические расчеты

удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными в полном угловом диапазоне.

Таким образом, данные по упругому рассеянию ионов углерода на ядрах кислорода при низких энергиях удастся воспроизвести в полном угловом диапазоне с учетом вклада механизма упругой передачи альфа-кластера.



символы – экспериментальные данные, красная линия – сечения, рассчитанные в рамках оптической модели ядра с потенциалами из таблицы, синяя линия – расчет методом искаженных волн по программе DWUCK5

Рисунок 2. Дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе выполнено описание угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в широком интервале энергии в рамках оптической модели и метода искаженных волн.

Из подгонок угловых распределений упругого рассеяния в области передних углов получены оптимальные значения параметров потенциалов взаимодействия для системы  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ .

Учет вклада механизма упругой передачи альфа-кластера в сечение процесса рассеяния вычисленный в рамках метода искаженных волн позволил описать подъем сечений в области обратных углов при низких энергиях.

Из величины отталкивающего кора вычисленно в рамках оптической модели с  $l$ -зависимым потенциалом была получена константа сжимаемости ядерной материи, которая согласуется с величиной, полученной из данных по гигантскому монополюному резонансу.

Найденные параметры оптического потенциала будут полезными для проведения корректных расчетов астрофизических реакций горения углерода и кислорода в звездах.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Szilner S., Nicoli M.P., Basrak Z., Freeman R.M., Haas F., Morsad A., Brandan M.E., Satchler G.R. Refractive elastic scattering of carbon and oxygen nuclei: The mean field analysis and Airy structures // Phys. Rev. C. – 2001. – Vol.64, №6. – id.064614.
2. Nicoli M.P., Haas F., Freeman R.M., Szilner S., Basrak Z., Morsad A., Satchler G.R., Brandan M.E. Detailed study and mean field interpretation of  $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$  elastic scattering at seven medium energies // Phys. Rev. C. – 2000. – Vol.61, №3. – id.034609.
3. Burtbayev N. et al., Investigation of Elastic Scattering of  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  And  $^{14}\text{N}$  on the  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  Nuclei at Energies Near The Coulomb Barrier // LX International Conference of Nuclear Physics «NUCLEUS 2010». July 6 – 9, 2010, Saint-Petersburg, Russia.
4. Гриднев К.А., Родионова Е.Е., Фадеев С.Н. // ЯФ. 2008. Т. 71. С. 1290.
5. Dao T. Khoa, von Oertzen W., Bohlen H.G. et al. // J. Phys. G. 2007. V. 34. P. 111.
6. Известия РАН. Серия Физическая, 2011, том 75, № 7, с. 1016–1018.

**$^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  РЕАКЦИЯСЫН КЕҢ ДИАПАЗОНДЫ ЭНЕРГИЯДА ЗЕРТТЕУ**

**Бұртебаев Н., Мәди Ғ.Ә., Еденбаев А.Н., Кенжебеков А.С.**

*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

Осы жұмыста  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  жүйесінің серпімді шашырауының тәжірибелік деректерін екі әдіспен: қабықшасы  $l$ -тәуелді оптикалық модель бойынша және құрама әдіспен түсіндіріледі. Ұсынылған әдіс негізіндегі есептермен тәжірибелік деректер жақсы келісетіндігі айқындалды. Тәжірибелік деректерді саралаудан кең интервал энергияда серпімді шашырау бойынша әсерлесудің оптикалық потенциалының глобалды параметрлері табылды.

Жұмыстың мақсаты  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  жүйенің  $E_{lab}=15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$  МэВ энергиялардағы серпімді шашырауы бойынша тәжірибелік деректерін анығырақ түсіндіру болып табылады. Артқы бұрыштарда әсерлесудің алмасу рөлі зерттеледі. Алынған ядролық материялардың сығымдылық коэффициенті аса зор монополиялы резонанс бойынша алынған деректер шамасымен үйлеседі. Артқы жартылай сферадағы қималарды жаңғырту үшін  $\alpha$ -кластердің берілуі ескерілді.

**STUDY OF THE REACTION  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  IN WIDE RANGE OF ENERGIES**

**N. Burtbayev, G.A. Madi, A.N. Yedenbayev, A.S. Kenzhebekov**

*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

In this work we describe the experimental data of elastic scattering of  $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$  in two ways: by the optical model with  $l$ -dependent  $k$  and combined way. A good agreement was taken between the experimental data with calculations based on the proposed methods. From the analysis of experimental data on elastic scattering in a wide energy range have found global optical potential parameters of interaction.

The purpose of the given work is more exact description of the experimental data of elastic scattering of the systems  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  at energies  $E_{lab} = 15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$  MeV. The role exchange interaction in the range of back angles is investigated. The received values of coefficient of compressibility of nuclear matter are consistent from the data which obtained on the giant monopole resonance. To reproduce section in the rear hemisphere was accounted transfer  $\alpha$ -cluster.